白昕欣, 黄萧霖, 秦孟晟, 张岳芳, 陈留根, 郭智, 郝璐. 亚热带地区水稻田地表反照率变化特征[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170267
Bai X X, Huang X L, Qin M S, Zhang Y F, Chen L G, Guo Z, Hao L. Characteristics of surface albedo in subtropical paddy rice fields [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170267

亚热带地区水稻田地表反照率变化特征*

白昕欣[1], 黄萧霖[1], 秦孟晟[1], 张岳芳[2], 陈留根[2], 郭　智[2], 郝　璐[1**]
(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室　南京　210044; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所　南京　210014)

摘　要: 利用地面实测资料研究稻田地表反照率, 一方面可以更好地刻画以稻田为主要土地利用方式的流域地气之间的能量分配过程; 另一方面, 可以为陆面模式提供更为准确的参数值, 以及为遥感反演的地表反照率提供验证, 从而为更好地解释土地利用/覆被变化对全球气候变化的影响机制提供参考。本文利用江苏省农业科学院溧水试验基地四分量仪测得的 2016 年稻田地表反照率数据, 分析了稻田地表反照率特征, 并结合同期观测的太阳短波辐射、温度、湿度、风速、风向等气象数据, 进行相关性分析, 识别影响稻田地表反照率的主要气象因子, 为进一步量化地表反照率与温度及湿度等的参数化关系提供参考。结果表明: 晴天稻田地表反照率整体上呈"U"型分布, 中午较低, 下午和上午较高。晴天稻田地表反照率在一天内的变化呈不对称特性, 其不对称性主要是由露水和风速、风向引起。太阳高度角较小时, 露水的散射作用使得上午时分的地表反照率值较下午高; 而太阳高度角较大时, 西南风促使作物叶面倾斜, 从而使得下午的地表反照率值较上午高。稻田晴天地表反照率值较阴雨天高。地表反照率在晴天与出射短波辐射相关系数最高(0.670, P<0.01), 在阴天与相对湿度之间的相关程度最高(−0.480, P<0.05)。在整个观测期间, 稻田生长季内地表反照率呈现先升高后降低的趋势, 地表反照率最高值出现在灌浆期到成熟期之间, 插秧到分蘖期之间最低, 其中灌浆期地表反照率与太阳短波辐射及湿度间的相关程度较高, 并且均通过了 P<0.01 显著性检验。分蘖期和拔节期是水稻生长季内地表反照率变化较快的两个生育期, 并受气象因素的显著影响。

关键词: 水稻田; 地表反照率; 生长季; 不对称; 气象因子
中图分类号: P422　　**文献标识码:** A

Characteristics of surface albedo in subtropical paddy rice fields*

BAI Xinxin[1], HUANG Xiaolin[1], QIN Mengsheng[1], ZHANG Yuefang[2], CHEN Liugen[2], Guo Zhi[2], HAO Lu[1**]
(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: As a key input parameter of numerical climate models and surface energy balance equations, surface albedo affects climatic systems on the earth. Data observed on rice paddy surface albedo not only better depict energy distribution between ground and atmosphere in paddy fields, but also provide more accurate parameter values for land surface models. It also provides authentication for remote sensing inversions of surface albedo and therefore better explains the effects of land use/cover change mechanism on global climate change. Using CNR4 measured surface albedo in paddy fields at Lishui Experiment Station in 2016, we analyzed the characteristics of surface albedo of paddy field. In the study, we combined the analysis of surface albedo with temperature, humidity, wind speed, wind direction and other meteorological data. Some other possible factors affecting surface albedo in paddy fields were also analyzed. The correlation coefficient between surface albedo and temperature reflected the effect of land surface albedo on temperature. The correlation between surface albedo and meteorological factors (e.g., humidity and solar radiation) was used to study the relationship among surface albedo, temperature and humidity. The results showed that surface albedo had a U-type of distribution for sunny days, which was lowest at noon, highest in the afternoon and morning, but also affected by precipitation. Surface albedo on sunny days was asymmetrical, which was mainly caused by dew, wind speed and wind direction. As

---

* 国家自然科学基金项目(41571026, 71373130)和南京信息工程大学本科生优秀毕业论文(设计)支持计划项目资助
**通讯作者: 郝璐, 主要研究方向为应用气象。E-mail: hl_haolu@163.com
白昕欣, 主要研究方向为应用气象。E-mail: baiinin@163.com
收稿日期: 2017-03-31　接受日期: 2017-06-30
* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41571026, 71373130) and the Outstanding Undergraduate Thesis (Design) Support Program of Nanjing University of Information Science and Technology.
**Corresponding author, E-mail: hl_haolu@163.com
Received Mar. 31, 2017; accepted Jun. 30, 2017

actual air temperature was close to dew point temperature at night, more dew settled on leaves in the morning. When solar altitude angle was small, the scattering effect of dew resulted in higher surface albedo in the morning than in the afternoon. When solar altitude angle was high, dew on leaf surfaces gradually evaporated. Southwest winds influenced the tilting of crop leaves, resulting in higher surface albedo in the afternoon than in the morning. Surface albedo was higher on sunny days than on cloudy and rainy days. The correlation coefficient between surface albedo and outgoing shortwave radiation was highest (0.670, $P < 0.01$) on sunny days, while the correlation coefficient between surface albedo and relative humidity was highest (−0.480, $P < 0.05$) on cloudy days. The trend in surface albedo during the growing season initially increased and then decreased. Surface albedo was highest during grain-filling to mature stage of rice and was lowest during transplanting to tillering stage. The correlation coefficient among surface albedo, humidity and shortwave radiation for rice growing season was high. Also the correlation coefficients between surface albedo and temperature, and then between humidity and shortwave radiation were not the same for different growth stages. During grain-filling period, the correlation among surface albedo, solar shortwave radiation and humidity was more significant, all above $P <$ 0.01 significance level. Surface albedo changed greatly at tillering and jointing stages, and were significantly affected by climatic factors.

Keywords: Rice paddy field; Surface albedo; Growing season; Asymmetrical; Meteorological factors

地表反照率控制着到达地球表面的净辐射能量[1]，反映地气之间的能量分配状况，是地球气候系统的关键变量，对地表和大气之间的水热交换具有重要的意义[2-4]。当入射到地表的太阳短波辐射一定时，地表反照率越大，说明地表反射的太阳辐射越多，地表吸收的能量较少；而地表反照率越小，说明地表反射的太阳辐射越少，地表吸收的能量较多，则会引起一定的增温效应[5]。地表反照率影响地表温度、蒸散、光合作用和呼吸作用等生物物理及化学过程，因此地表反照率直接或间接地影响着全球及区域气候[5]。

高分辨率的地表反照率参数在监测降水以及农作物灾害等突发自然过程，作物种植、作物收获等地区尺度的人类活动过程[6-8]，自然生态系统的辐射能量平衡过程[9]和城市热岛[10]等中具有重要作用。作为许多陆面气候模式和地表能量平衡方程中的一个重要输入参数，地表反照率是影响地球气候系统的关键变量[11]。

地表反照率的大小受多种因素的共同影响。地表反照率随太阳高度角的增大而减小，随土壤湿度的增加而减小[12]。陈云浩等[13]利用 NOAA 卫星资料对我国西北地区的地表反照率进行反演发现，在植被覆盖度和土壤湿度状况的共同影响下，我国西北地区地表反照率呈现明显的地带性分布。杨娟等[10]利用 MODIS 地表双向反照率产品 MOD43B3 研究了北京地区地表反照率时空分布及变化特征，发现山区的地表反照率最低，其次为北京城区，而平原区和永定河流域的地表反照率较高。蔡福等[14]用 NCEP 再分析资料，发现一年中夏季 7 月的地表反照率最低，春秋季的地表反照率较高，而冬季 1 月的地表反照率最高。遥感方法是获取大区域地表反照率的有效方法。但是，遥感数据反映的是地表综合信息，与其分辨率有关，所以遥感反演的地表反照率需要实测资料的验证。另一方面，当前陆面过程模式中，地表反照率作为诊断变量由其他参数导出，在时间和空间上存在较大的不确定性[2]。因此，考虑下垫面的空间异质性，尽可能地开展各种不同下垫面地表反照率观测试验具有重要意义。

张亚峰等[15]的研究了干旱区春小麦(*Triticum aestivum*)发育期反照率变化特征，发现晴天地表反照率在每日内的变化呈“U”型分布，而其日变化的不对称性主要是受上午附着在春小麦叶表面的露珠影响。余予等[16]研究了安徽省寿县地区小麦田和水稻(*Oryza sativa*)田的地表反照率变化，发现麦田和稻田整个生育期内的地表反照率具有大致相同的变化趋势。尽管前人对农田地表反照率有了一定的研究，但是对不同气候年型下的农田地表反照率，尤其是亚热带地区水稻田地表反照率的相关研究较少。本研究观测了 2016 年偏暖湿气候年型下的稻田地表反照率，分析了水稻地表反照率变化特征。

本文以亚热带地区秦淮河流域水稻田为研究对象，利用江苏省农业科学院溧水试验基地的四分量仪，分析了不同天气状况下以及生长季内稻田地表反照率变化特征，并结合温度，湿度及风速、风向等气象数据，分析了其可能影响因素，以期为陆面模式提供相关参数以及为遥感反演的地表反照率提供地面验证。

1　研究方法

1.1　研究区概况

研究站点位于江苏省农业科学院溧水试验基地，该基地位于溧水县白马镇(119.2°E, 31.6°N，海拔高度 38 m)，总面积为 0.8 km^2，站点四周均为水稻田，水源来自于白马湖水库。基本地貌类型为丘陵，土质类型为白浆土。基地属于秦淮河流域，为亚热带季风气候，雨量充沛，年降水量为 1 048 mm，四季分明，年平均温度 15.4 ℃。根据溧水站多年气象观测数据(1985—2016 年，包括气温、降水量以及相对湿度)分析，溧水 2016 年 5 月和 6 月的平均气温较历年偏低，而其他月份的平均气温较历年偏高。2016 年水稻生长季平均气温略高于历年同期值。除 8 月份外，2016 年水稻生长季内各月的相对湿度和降水量均大于历年同期值。总

体上, 2016 年水稻生长季属于偏暖湿年份(表 1)。观测站点种植的水稻品种为'南粳 9108', 2016 年的插秧时间为 6 月 17 日, 6 月 27 日进入分蘖期, 7 月 15 日进入拔节期, 8 月 12 日进入抽穗期, 8 月 15 日进入灌浆期, 10 月 10 日进入成熟期, 10 月 25 日收获。

表 1　研究站点(溧水)2016 年气象条件与历年平均值(1985—2015 年)比较

Table 1　Monthly means of meteorological factors in 2016 and averages from 1985–2015 in the study area of Lishui

月份 Month	平均气温 Average Temperature (℃)		平均相对湿度 Relative humidity (%)		降水量 Precipitation (mm)	
	历年平均值 Average from 1985 to 2015	2016	历年平均值 Average from 1985 to 2015	2016	历年平均值 Average from 1985 to 2015	2016
1	3.0	2.9	75.8	—	52.4	73.8
2	5.3	—	74.9	—	67.3	16.6
3	9.7	10.7	73.3	—	97.8	29.7
4	15.9	16.9	71.4	—	87.5	180.3
5	21.3	19.9	72.2	77.9	101.8	167.1
6	24.9	24.7	77.1	84.6	189.0	408.7
7	28.5	29.6	78.6	83.1	188.4	531.4
8	27.7	30.3	80.4	75.8	149.3	74.0
9	23.4	24.4	79.2	81.8	75.5	389.0
10	17.9	18.9	75.6	88.5	53.3	272.3
11	11.4	12.1	75.4	—	54.9	50.5
12	5.3	8.0	74.0	—	33.7	65.4
年均值/总 Annual average / total	16.2	—	75.6	—	1 150.7	2 258.8

1.2　观测仪器与数据预处理

本文的地表反照率和气象数据来自基地安装的四分量净辐射传感器(CNR4)、雨量筒(TE525MM)、红外温度传感器(109-L50)以及风速风向传感器等常规气象观测仪器。由 CNR4 可分别测得向上和向下的短波辐射及向上和向下的长波辐射量, 短波辐射光谱范围为 0.31~2.80 μm, 长波辐射光谱范围为 4.20~42.00 μm。四分量净辐射传感器、红外温度传感器安装在稻田中央距地面 2 m 高度处, 风速风向传感器安装在稻田中央距地面 3 m 高度处, 雨量筒水平安装在稻田中央距地面 70 cm 高度处, 数据无重复。在数据分析过程中, 剔除缺测值, 选择白天 8:00—17:00 的半小时反照率数据, 求得白天的反照率日均值, 分析稻田生长季和生长季内水稻不同生育阶段以及非生长季的反照率变化特征。选择 4—11 月之间几个典型晴天的白天地表反照率数据, 分析稻田反照率的日变化特征, 再结合温度、相对湿度、风速风向等气象数据分析晴天白天反照率的不对称现象。根据晴天、阴天和雨天 3 种不同天气状况下的白天地表反照率数据, 分析稻田反照率在不同天气状况下的日变化特征。

采用作图法分析典型晴天和不同天气条件下以及整个生长季内稻田地表反照率的变化特征, 用 SPSS 软件的典型相关分析方法分析稻田地表反照率同短波辐射、温度及相对湿度之间的相关关系。用 MATLAB 软件处理了研究站点的历年气象条件数据。

2　结果与分析

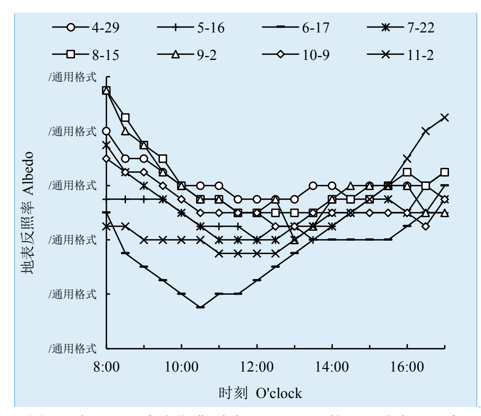
2.1　晴天稻田地表反照率的日变化特征

2.1.1　水稻不同发育期典型晴天的稻田地表反照率

从水稻播种之前到收获的不同阶段, 各选取一个典型晴天分析白天的地表反照率变化(图 1)。所选择的晴天日期分别是 4 月 29 日(插秧前期)、5 月 16 日(插秧前期)、6 月 17 日(插秧期)、7 月 22 日(拔节期)、8 月 15 日(灌浆期)、9 月 2 日(灌浆期)、10 月 9 日(成熟期)和 11 月 2 日(收获后期)。

从图 1 可以看出, 稻田日地表反照率整体呈现中午小、上午和下午较大的"U"型分布特征, 与张亚峰等[15]的研究结果相同。在所选取的几个典型晴天中, 地表反照率最低值均出现在中午左右, 而最高值在上午和下午均有分布。日反照率的最高值为 0.23, 出现在 8 月 15 日和 9 月 2 日的上午; 最低值为 0.07, 出现在 6 月 17 日接近中午的时候。水稻的晴天日地表反照率呈向上的抛物线主要受太阳高度角影响。地表反照率随太阳高度角的增加而减小, 中午太阳高度角较大, 上午和下午太阳高度角较小, 因此一天中中午的地表反照率较低, 上午和下午的地表反照率较高。

随着水稻生长，地表反照率的日变化特征变得更加明显。水稻插秧前期，日地表反照率变化幅度较小，最大值和最小值之间差异较小；水稻插秧之后，日地表反照率波动较大，最大值与最小值之间差异明显增大。典型晴天稻田地表反照率在中午较小，上午和下午较大，同太阳高度角呈相反的变化趋势，不同天气条件下，地表反照率也不同，因此水稻生长季内的地表反照率变化受太阳高度角和气象条件的共同影响。



批注 [cjea1]: Y 轴值分别为 0.04 0.08 0.12 0.16 0.20 0.24

图 1　水稻不同生育期典型晴天日(月-日)的稻田地表反照率

Fig. 1　Surface albedo of paddy fields in typical sunny days (month-day) in different growth periods of rice

4 月 29 日、5 月 16 日、6 月 17 日、7 月 22 日、8 月 15 日、9 月 2 日、10 月 9 日和 11 月 2 日分别处于水稻插秧前期、插秧前期、插秧期、拔节期、灌浆期、灌浆期、成熟期和收获后期。April 29, May 16, June 17, July 22, August 15, September 2, October 9 and November 2 are before transplant, before transplant, transplant, jointing, filling, filling, maturity and after harvest stages of rice, respectively.

2.1.2　晴天反照率不对称特征及其成因

晴天水稻田的地表反照率日变化呈现不对称现象[15]，不对称性由上午与下午地表反照率的差值占二者均值的百分数表示。选取 4 月 29 日(插秧前期)、5 月 16 日(插秧前期)、6 月 17 日(插秧期)、7 月 22 日(拔节期)、8 月 15 日(灌浆期)、9 月 2 日(灌浆期)、10 月 9 日(成熟期)和 11 月 2 日(收获后期)的典型晴天分析晴天稻田地表反照率的不对称特征(图 2)，选取 4 月 29 日(插秧前期)、5 月 16 日(插秧前期)、6 月 17 日(插秧期)、7 月 22 日(拔节期)、8 月 15 日(灌浆期)和 9 月 2 日(灌浆期)的典型晴天分析晴天稻田地表反照率的不对称成因(图 3、4、5)。

对于地表反照率半小时均值日变化呈不对称性的可能原因：一是植被叶面受到风速和风向的影响[17-19]，二是附着在植被上面的露水的散射作用使得反照率增加[20-22]。由图 2 可以看出，当太阳高度角小于 60°时，一般上午的地表反照率大于下午；当太阳高度角大于 60°时，下午的地表反照率值大于上午。利用典型晴天的气象数据，计算了各时间点的平均露点温度。通过露点温度和空气实际温度对比(图 3a)可以看出，夜晚实际气温和露点温度较为接近，有利于露水的产生；白天实际气度和露点温度差异较大，不利于露水的产生。由于夜晚产生的露水的散射作用使上午的地表反照率增加，从而导致了上午的地表反照率大于下午的不对称现象。

由典型晴天的平均入射短波辐射和出射短波辐射图(图 3b)可以看出，晴天上午的入射短波辐射明显高于下午，而上午的出射短波辐射和下午相当，说明这一时期的地表反照率主要受到下垫面状况的影响。由典型晴天的风速图(图 4)可以看出，上午和下午的风速较小，中午前后的风速较大，说明太阳高度角较大(中午前后)时地表反照率不对称性可能是受风的影响。典型晴天的风玫瑰图(图 5)表明，在观测区域，约 85%的风速大于 2 $m\cdot s^{-1}$，其主导风向为西南风。植被叶面受风向的影响，叶倾角发生改变，由于地表反照率随太阳高度角的增加而减小，上午叶面相对太阳的高度角增大，反照率减小；下午叶面相对太阳的高度角减小，地表反照率增大，因此产生了下午地表反照率大于上午的反照率不对称现象。

图 2 稻田不同时期典型晴天地表反照率的不对称性

Fig. 2 Surface albedo asymmetry of paddy fields in typical sunny days in different growth periods of rice

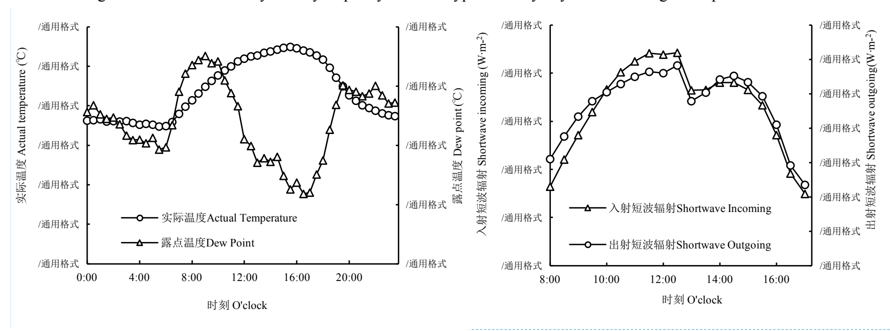


图 3 稻田不同时期典型晴天的露点温度(Td)与实际温度(T2)(a)和短波辐射量(b)的日变化特征

Fig. 3 Daily dynamics of dew point temperature (Td) and actual temperature (T2) (a) and shortwave radiation (Rs) (b) of paddy fields in typical sunny days in different growth periods of rice

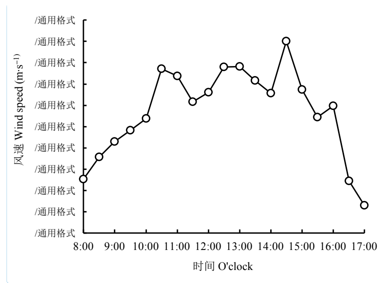


图 4 稻田不同时期典型晴天风速的日变化

Fig. 4 Daily dynamics of wind speed of paddy fields in typical sunny days in different growth periods of rice

批注 [cjea2]: X 轴数据 0，10 20 30 40 50 60 70 80 90

Y 轴数据 -60 -40 -20 0 20 40 60

批注 [cjea3]: 左图的左 Y 轴数据 0 5 10 15 20 25 30；右 Y 轴数据 14 15 16 17 18

右图的左 Y 轴刻度值 0 200 400 600 800 1000；右 Y 轴刻度值 0 20 40 60 80 100 120 140

批注 [cjea4]: Y 轴数据库 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6

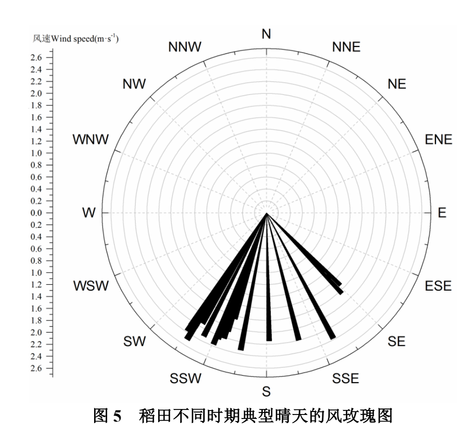


图 5　稻田不同时期典型晴天的风玫瑰图

Fig. 5　Wind rose map of paddy fields in typical sunny days in different growth periods of rice

2.2　不同天气状况下的地表反照率

选取 10 月 9 日(晴天)、10 月 11 日(阴天)和 10 月 7 日(雨天)代表 3 种不同天气状况，地表反照率调查结果(图 6)表明，稻田地表反照率整体上晴天>阴天>雨天。晴天和阴天的地表反照率不对称性较为明显，均为上午较高，下午较低；而雨天的地表反照率较为对称，这可能与晴天和阴天上午地表附着较多的露水有关。晴天地表接收的太阳短波辐射较大，土壤湿度较小，因此地表反照率较高。受太阳高度角的影响，地表反照率的日变化较为明显。阴天到达地表的太阳短波辐射较少土壤湿度较大，地表反照率较小，反照率的日变化幅度最小。雨天条件下，到达地表的太阳辐短波射最小，土壤湿度较大，反照率也相应的减小，地表反照率的日变化较幅度较小。

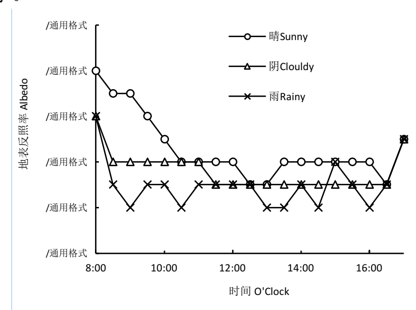


图 6　不同天气状况下的稻田地表反照率

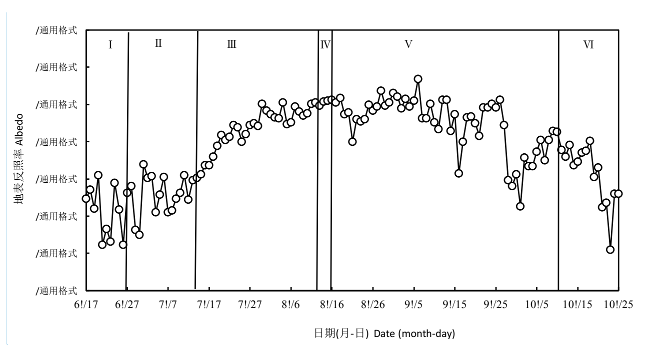
Fig. 6　Surface albedo of paddy fields under different weather conditions

批注 [cjea5]:

批注 [cjea6]: Y 轴刻度值 0.10　0.12　0.14　0.16　0.18　0.20

2.3　水稻不同发育期内的稻田地表反照率

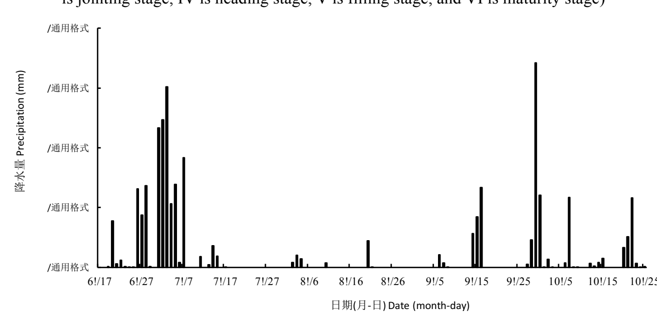
由图 7 可以看出，从 6 月 17 日水稻插秧到 10 月 25 日水稻收获，稻田的地表反照率整体上呈现先升高后降低的趋势，与 Raja 等[23]和 Zhang 等[24]的研究结果相同。整个生长季内，地表反照率最高值出现在灌浆期，插秧及成熟期的地表反照率最低。从 6 月 27 日开始水稻进入分蘖期，地表反照率呈现缓慢波动上升的趋势。7 月 15 日水稻进入拔节期，水稻生长旺盛，地表反照率迅速上升。8 月 12 日水稻进入抽穗期，地表反照率较大。8 月 15 日开始，水稻进入灌浆期，地表反照率呈现波动下降的趋势。10 月 10 日开始，水稻进入成熟期，由于水稻停止生长作物开始枯萎，地表反照率迅速降低。由图 8 可以看出，6 月底到 7 月上旬(分蘖期)之间以及 9 月初到 10 月上旬(灌浆期)之间降水量较多，并且这两个时期的地表反照率波动较大；而水稻生长季内的其他时期，降水量较小且地表反照率的波动性不明显，因此，降水的增多可能是导致分蘖期和灌浆期地表反照率波动较大的一个共同原因。



批注 [cjea7]: Y 轴刻度值为 0.06 0.08 0.10 0.12 0.14 0.16 0.18 0.20

图 7　水稻生长季内的稻田地表反照率(I 为水稻插秧到分蘖期, II 为水稻分蘖期, III 为水稻拔节期, IV 为水稻抽穗期, V 为水稻灌浆期, VI 为水稻成熟期)

Fig. 7　Surface albedo of paddy fields during rice growing season (I is from transplant stage to tillering stage, II is tillering stage, III is jointing stage, IV is heading stage, V is filling stage, and VI is maturity stage)



批注 [cjea8]: Y 轴刻度值 0 40 80 120 160

图 8　水稻生长季内的降水量

Fig. 8　Precipitation during rice growing season

2.3　稻田反照率与温度、湿度及短波辐射之间的关系

2.3.1　不同天气状况下稻田反照率与温度、湿度及短波辐射之间的关系

相关性分析表明(表 1), 晴天地表反照率与地表 2 m 处的温度、湿度及短波辐射之间的相关程度较高, 其中与出射短波辐射显著相关(0.670, P<0.01)。阴天地表反照率与相对湿度之间的相关程度最高。雨天地表反照率与三者之间的相关程度均比较低。

incidence 表 2　不同天气状况下稻田反照率与温度、湿度及短波辐射之间的相关关系

Table 2 Correlativity between albedo and temperature, humidity and shortwave radiation in different weather conditions

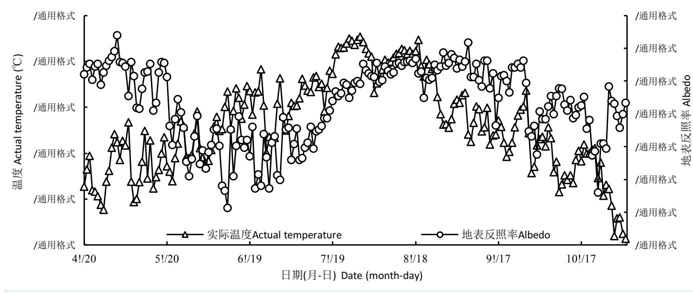
天气 Weather	项目 Item	温度 Temperature	入射短波辐射 Rs incoming	出射短波辐射 Rs outgoing	相对湿度 Relative humidity
晴天 Sunny day	相关系数 Correlation coefficient	0.302	0.218	0.67**	−0.29
(n=25)	P	0.142	0.296	0	0.159
阴天 Cloudy day	相关系数 Correlation coefficient	0.302	0.257	0.441*	−0.48*
(n=21)	P	0.057	0.26	0.045	0.028
雨天 Rainy day	相关系数 Correlation coefficient	−0.232	0.053	0.24	−0.273
(n=35)	P	0.179	0.761	0.164	0.113

*和**分别代表在 95%和 99%置信区间显著相关。* and ** represent significant correlations at 95% and 99% confidence intervals, respectively. Rs is shortwave radiation.

2.3.2　不同发育期稻田反照率与温度、湿度及短波辐射之间的关系

1)稻田反照率与温度及短波辐射变化

在水稻生长初期，稻田反照率与温度存在明显的相反趋势(图 9)。4 月 20 日到 7 月上旬地表反照率减小，地表吸收的太阳辐射增加，地表温度上升。9 月底，地表反照率开始升高，地表吸收的太阳辐射减少，地表温度下降。其他阶段，植被生长较为旺盛，地表反照率与地表温度的关系较不明显。

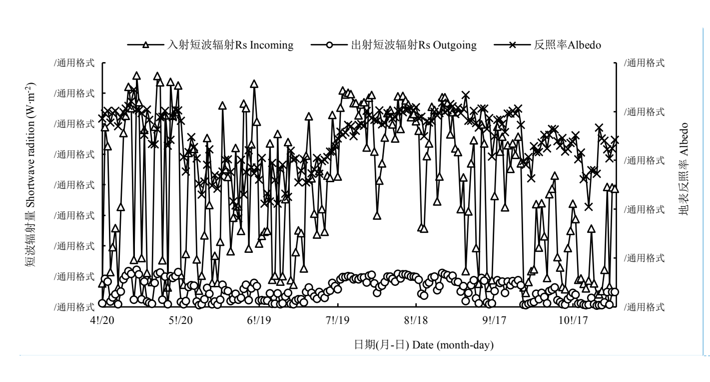


批注 [cjea9]: 左 Y 轴刻度值： 10 15 20 25 30 34
右 Y 轴刻度值 0.05 0.07 0.09 0.11 0.13 0.15 0.17 0.19

图 9　观测期内的稻田地表反照率与温度的变化

Fig. 9　Changes of surface albedo and temperature in paddy field during the observation period

地表的入射短波辐射与出射短波辐射在时间上的变化趋势基本保持一致，而地表反照率的变化趋势略滞后于入射和出射短波辐射的变化趋势(图 11)。在稻田未整地之前，地表反照率同入射短波辐射的变化趋势最为一致，这一时期下垫面状况基本保持不变，而入射到地表的短波辐射主要受太阳高度角和天气状况影响；开始整地插秧后，下垫面改变对出射短波辐射的影响较大，地表反照率相对入射短波辐射滞后现象较为明显，其中水稻生长较为旺盛时期这种滞后现象最为明显，说明这一阶段，除了太阳高度角和天气状况的影响，作物的生长状况对地表反照率的影响也较大。



批注 [cjea10]: 左 Y 轴刻度值为 0 100 200 300 400 500 600 700 800
右 Y 轴刻度值为 0 0.04 0.08 0.12 0.16 0.18 0.20

图 10　观测期内的短波辐射量与地表反照率

Fig. 10　Changes of shortwave radiation (Rs) and surface albedo of paddy fields during the observation period

2)不同发育期稻田反照率与温度、湿度及短波辐射之间的相关关系

相关性分析表明，整个观测期内地表反照率与温度及短波辐射之间呈正相关关系，与地表 2 m 处相对湿度呈负相关关系。水稻生长季内地表反照率与湿度及短波辐射之间的相关程度较高。水稻不同生育期内地表反照率与温度、湿度及短波辐射之间的相关程度差异较大，其中灌浆期地表反照率与太阳短波辐射及相对湿度间的相关程度较高，并且均通过了 P<0.01 显著性检验。相对于水稻生育期，稻田非生育期内(水稻插秧之前和收获之后)的地表反照率与地表 2 m 处的温度相关程较高，与湿度及短波辐射之间的相关程度较低(表 2)。

表 3　水稻不同发育期地表反照率与温度、湿度及短波辐射之间的相关关系

Table 3　Correlativity between albedo and temperature, humidity and shortwave radiation of paddy fields in different growth periods of rice

时期 Period	项目 Item	温度 Temperature	入射短波辐射 Rs incoming	出射短波辐射 Rs outgoing	相对湿度 RH
观测期(4 月 20 日—11 月 2 日) Observation period (from Apr. 20 to Nov. 2) (*n*=197)	相关系数 Correlation coefficient	0.121	0.389**	0.587**	−0.53**
	P	0.091	0	0	0
生长季(6 月 17 日—26 日) Growing season (from Jun. 17 to 26) (*n*=131)	相关系数 Correlation coefficient	0.289**	0.483**	0.673**	−0.626**
	P	0.001	0	0	0
非生长季(4 月 20 日—5 月 20 日, 10 月 26—11 月 2 日) No growing season (from Apr. 20 to May 20, and from Oct. 26 to Nov. 2) (*n*=39)	相关系数 Correlation coefficient	0.583**	0.334*	0.413**	−0.429**
	P	0	0.038	0.009	0.006
插秧(6 月 17 日—25 日) Transplanting (from Jun. 17 to 26) (*n*=10)	相关系数 Correlation coefficient	−0.119	−0.178	0.024	−0.09
	P	0.743	0.622	0.947	0.805
分蘖期(6 月 26 日—7 月 14 日) Tillering stage (from Jun. 26 to Jul. 14) (*n*=18)	相关系数 Correlation coefficient	−0.333	−0.709**	−0.598**	0.729**
	P	0.177	0.001	0.009	0.001
拔节期(7 月 15 日—8 月 14 日) Jointing stage (*n*=28)	相关系数 Correlation coefficient	0.395*	0.166	0.465*	−0.232
	P	0.037	0.399	0.013	0.235
灌浆期(8 月 15 日—10 月 9 日) Grain filling stage (from Aug. 15 to Oct. 9) (*n*=56)	相关系数 Correlation coefficient	0.49**	0.698**	0.737**	−0.714**
	P	0	0	0	0
成熟期(10 月 10 日—25 日) Mature period (from Oct. 10 to 25) (*n*=16)	相关系数 Correlation coefficient	−0.005	0.537*	0.595**	−0.797
	P	0.985	0.032	0.015	0

*和**分别代表在 95%和 99%置信区间显著相关。* and ** represent significant correlations at 95% and 99% confidence intervals, respectively. Rs is shortwave radiation.

4 讨论

4.1 稻田与其他农田的地表反照率对比

已有的相关研究结果表明[25-27]，不同下垫面地表反照率差异较大，其中雪地的地表反照率最大，可以接近 0.9 左右，其次为植被覆盖较少的荒漠、戈壁、退化的草地及裸地等，在植被覆盖较多的地区如农田和森林，地表反照率较小，森林的地表反照率最小，农田下垫面中因种植作物类型的差异[28]，地表反照率也有所不同。干旱区的麦田反照率大于半湿润区，这可能是由于半湿润区土壤湿度较大。对比小麦生育期内反照率[15-16]和本文稻田生育期内反照率的观测结果，发现麦田和稻田整个生育期内的反照率变化规律大致相同，均为先升高再减小。余予等[16]对比了小麦田和水稻田的反照率变化，发现生长初期小麦田的反照率比水稻田高 0.02，生长中期小麦田和水稻田的反照率相当，孕穗期后水稻田的反照率高于小麦田的反照率，完全成熟时水稻田的反照率比小麦田反照率高约 0.04。本文的水稻生育期内地表反照率同余予等[16]的变化趋势基本相似，都是在抽穗期和灌浆期较大，从插秧到分蘖期和成熟期较小。但是，在同一生育期内，本文的地表反照率较小，这可能是由于溧水实验基地位于秦淮河流域内，周围水库较多，水分充裕，土壤湿度较大的缘故。

4.2 影响地表反照率的因子

Liu 等[25]发现玉米(*Zea mays*)农田地表反照率与太阳高度角和土壤湿度呈负相关关系，与植被指数呈正相关关系。郑志远等[29]发现裸土地表反照率随太阳高度角及土壤湿度的增加而减小。张乐乐等[30]研究发现，土壤水分增加，地表反照率明显减小，而且这种关系还受到植被生长周期的影响。Usowicz 等[31]发现随着生物炭用量的增加，地表反照率明显减小，并且降雨过后，休耕地的地表反照率降低，而草地则相反。李慧芳等[32]研究了内蒙古锡林浩特市地表反照率，均发现地表反照率与归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)呈负相关关系。Bsaibes 等[33]研究发现，叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)同地表反

照率之间的关系受土地覆被类型的影响，且LAI较小时，地表反照率的差异较大，而随着LAI的增加，地表反照率趋于稳定。由此可见，地表反照率的大小受到多种因素的共同影响，如下垫面的颜色、植被覆盖率、土壤温度、土壤湿度、太阳高度角和大气透过率等。

我们的结果表明，典型晴天状况下，稻田地表反照率与太阳高度角有关，白天中午地表反照率最低，上午和下午地表反照率较大，因此地表反照率随太阳高度角的增加而减小。同时，晴天地表反照率每日内的变化特征还受到当天昼夜温差及风的影响，太阳高度角小于 60°时，昼夜温差导致上午植被表面附着较多露水，同一太阳高度角下上午地表反照率较下午大；而太阳高度角小于 60°时，风使得植被叶面倾斜，同一太阳高度角下下午地表反照率较上午大。地表反照率也与天气状况有关，晴天大气透过率较大，地表反照率也较大，而阴雨天大气透过率较小，地表反照率也较小。地表反照率还与水稻的生长状况有关。水稻生长初期，地表反照率随水稻的生长而增加，在水稻接近成熟时，稻田地表反照率变化较为平缓。当水稻成熟时，地表反照率开始下降，水稻收获之后，地表反照率进一步降低。对于土壤湿度及植被覆盖度等因子对地表反照率的影响研究，将是未来需要开展的重点。

5　结论

1)晴天稻田地表反照率整体上呈“U”型分布，中午较低，下午和上午较高。随着水稻的生长，地表反照率的日变化特征变得更为明显。晴天稻田地表反照率的不对称性主要是由露水和风速风向引起，太阳高度角较小时，露水的散射作用使得上午的地表反照率值较下午高，而太阳高度角较大时，西南风促使作物叶面倾斜，从而使得下午的地表反照率值较上午高。

2)不同天气状况下的地表反照率不同，稻田晴天地表反照率值较阴雨天高。晴天地表反照率变化趋势较大，阴天和雨天变化趋势较小。晴天和阴天时的地表反照率的不对称性较为明显。地表反照率在晴天与出射短波辐射相关系数最高(0.67, $P<0.01$)，在阴天与相对湿度之间的相关程度最高(−0.48, $P<0.05$)。

3)生长季内地表反照率呈现先升高后降低的趋势，并会受到降水的影响。整个生长季内，地表反照率最高值出现在灌浆期到成熟期之间，插秧到分蘖期之间最低。水稻生长季内地表反照率与湿度及短波辐射之间的相关程度较高，但是不同生育期内地表反照率与温度、湿度及短波辐射之间的相关程度差异较大，其中灌浆期地表反照率与太阳短波辐射及湿度间的相关程度较高，并且均通过了 $P<0.01$ 显著性检验。

参考文献 References

[1] Russell M J, Nunez M, Chladil M A, et al. Conversion of nadir, narrowband reflectance in red and near-infrared channels to hemispherical surface albedo[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(1): 16–23

[2] 肖登攀, 陶福禄, Moiwo Juana P. 全球变化下地表反照率研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1217–1224
Xiao D P, Tao F L, Moiwo Juana P. Research progress on surface albedo under global change[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(11): 1217–1224

[3] Betts R A. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo[J]. Nature, 2000, 408(6809): 187–190

[4] 蒋熹. 冰雪反照率研究进展[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 728–738
Jiang X. Progress in the research of snow and ice albedo[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 728–738

[5] Schwaiger H P, Bird D N. Integration of albedo effects caused by land use change into the climate balance: Should we still account in greenhouse gas units?[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 260(3): 278–286

[6] 赵东妮, 王艳华, 任传友, 等. 3 种水稻趋势产量拟合方法的比较分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 345–355
Zhao D N, Wang Y H, Ren C Y, et al. Comparative analysis of three fitting methods of rice trend yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 345–355

[7] 戴彤, 王靖, 赫迪, 等. 1961-2010 年气候变化对西南冬小麦潜在和雨养产量影响的模拟分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 293–305
Dai T, Wang J, He D, et al. Impact simulation of climate change on potential and rainfed field yields of winter wheat in Southwest China from 1961 to 2010[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(3): 293–305

[8] Gao B, Jia L, Wang T X. Derivation of land surface albedo at high resolution by combining HJ-1A/B reflectance observations with MODIS BRDF products[J]. Remote Sensing, 2014, 6(9): 8966–8985

[9] Wang R, Chen J M, Pavlic G, et al. Improving winter leaf area index estimation in coniferous forests and its significance in estimating the land surface albedo[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 119: 32–48

[10] 杨娟, 陈洪滨, 王开存, 等. 利用MODIS卫星资料分析北京地区地表反照率时空分布及变化特征[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(5): 403–406

Yang J, Chen H B, Wang K C, et al. Analysis of the surface albedo distribution and variation in Beijing region by using the MODIS data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(5): 403–406

[11] 张超, 宋海清, 吴国周, 等. NCAR/CLM系列陆面模式对内蒙古地表温度的模拟评估[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 299–308
Zhang C, Song H Q, Wu G Z, et al. Simulation and comparative analysis of surface temperature over Inner Mongolia using four NCAR community land models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 299–308

[12] Dexter R H, Bailey W G, McArthur L J B. Albedo of wheat during a growing season: Diurnal symmetry and asymmetry[C]//26th Conference on Agricultural and Forest Meteorology. British Columbia, Canada: American Meteorological Society, 2004

[13] 陈云浩, 李晓兵, 谢锋. 我国西北地区地表反照率的遥感研究[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 327–333
Chen Y H, Li X B, Xie F. Study on surface albedo distribution over Northwest China using remote sensing technique[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(4): 327–333

[14] 蔡福, 祝青林, 何洪林, 等. 中国月平均地表反照率的估算及其时空分布[J]. 资源科学, 2005, 27(1): 114–120
Cai F, Zhu Q L, He H L, et al. Estimation and spatio-temporal distribution of monthly mean surface albedo in China[J]. Resources Science, 2005, 27(1): 114–120

[15] 张亚峰, 王新平, 潘颜霞, 等. 干旱区春小麦发育期反照率变化及其不对称性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 120–125
Zhang Y F, Wang X P, Pan Y X, et al. Variations of surface albedo and its diurnal asymmetry at different growing stages of spring wheat in arid areas[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 120–125

[16] 余予, 李扬云, 童应祥, 等. 寿县地区小麦和水稻田地表反照率观测分析[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(6): 639–645
Yu Y, Li Y Y, Tong Y X, et al. Observation and analysis of surface albedo of wheat and rice fields in Shouxian region[J]. Climatic and Environment Research, 2009, 14(6): 639–645

[17] Song J. Diurnal asymmetry in surface albedo[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 92(3): 181–189

[18] Ripley E A, Redmann R E. Grassland[M]//Monteith J L. Vegetation and the Atmosphere. London: Academic Press, 1976

[19] Grant I F, Prata A J, Cechet R P. The impact of the diurnal variation of albedo on the remote sensing of the daily mean albedo of grassland[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39(2): 231–244

[20] Minnis P, Mayor S, Smith W L, et al. Asymmetry in the diurnal variation of surface albedo[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 879–890

[21] 王胜, 张强, 张鸿. 稀疏植被地表反照率及土壤热传导率特征研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 119–124
Wang S, Zhang Q, Zhang H. Characteristics of surface albedo and soil heat conductivity in sparse vegetation site[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(1): 119–124

[22] 文丽娟, 吕世华, 陈世强, 等. 干旱区绿洲地表反照率不对称观测研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(7): 953–956
Wen L J, Lü S H, Chen S Q, et al. Observation study on diurnal asymmetry in surface albedo of oasis in arid region[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2009, 30(7): 953–956

[23] Raja R, Nayak A K, Rao K S, et al. Effect of fly ash deposition on photosynthesis, growth and yield of rice[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2014, 93(1): 106–112

[24] Zhang Y F, Wang X P, Pan Y X, et al. Diurnal and seasonal variations of surface albedo in a spring wheat field of arid lands of Northwestern China[J]. International Journal of Biometeorology, 2013, 57(1): 67–73

[25] Liu H Z, Tu G, Dong W J. Three-year changes of surface albedo of degraded grassland and cropland surfaces in a semiarid area[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(8): 1246–1254

[26] 孙俊, 胡泽勇, 荀学义, 等. 黑河中上游不同下垫面反照率特征及其影响因子分析[J]. 高原气象, 2011, 30(3): 607–613
Sun J, Hu Z Y, Xun X Y, et al. Albedo characteristics in different underlying surfaces in the mid and upper-reaches of HEIFE and its impact factor analysis[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(3): 607–613

[27] 陈琛. 淮河流域农田生态系统能量平衡与闭合研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012: 1–71
Chen C. Observational study of surface energy balance and energy closure in the farmland ecosystems in Huaihe River Basin[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2012: 1–71

[28] 张雯, 谢辉, 张平, 等. 扁桃||冬小麦间作模式下树冠结构对间作区域光环境的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 753–761
Zhang W, Xie H, Zhang P, et al. Effect of tree canopy structure on light condition in almond-winter wheat intercropping systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 753–761

[29] 郑志远, 韦志刚, 李振朝, 等. 敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率参数化研究[J]. 大气科学, 2014, 38(2): 297–308
Zheng Z Y, Wei Z G, Li Z C, et al. Study of parameterization of surface albedo of bare soil over the ggobi desert in the Dunhuang Region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(2): 297–308

[30] 张乐乐, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原唐古拉地区暖季土壤水分对地表反照率及其土壤热参数的影响[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 351–358
Zhang L L, Zhao L, Li R, et al. Investigating the influence of soil moisture on albedo and soil thermodynamic parameters during the warm season in Tanggula Range, Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2): 351–358
[31] Usowicz B, Lipiec J, Mateusz Łukowski M, et al. The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 164: 45–51
[32] 李慧芳, 袁占良, 余涛, 等. HJ-1/CCD地表反照率估算及其与NDVI关系分析[J]. 遥感信息, 2012, 27(4): 16–21
Li H F, Yuan Z L, Yu T, et al. Surface albedo estimating based on HJ-1/CCD and relationship analysis between albedo and NDVI[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(4): 16–21
[33] Bsaibes A, Courault D, Baret F, et al. Albedo and LAI estimates from FORMOSAT-2 data for crop monitoring[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(4): 716–729